

基于气象因子的松墨天牛发生率空间格局研究*

王庆¹, 毕猛¹, 马思佳², 石雷^{1**}

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学, 云南 昆明 650224)

摘要: 根据全国范围内 2002—2012 年松墨天牛逐年发生数据, 选取发生松墨天牛虫害地级行政区的平均发生率作预测指标, 在 ClimateChina v4.40 气候模拟软件中, 计算出发生地区的气象数据。利用偏最小二乘回归, 得到松墨天牛平均发生率与气象因子的回归方程, 即松墨天牛平均发生率空间格局模型, 并结合地理空间数据和属性数据, 预测未来我国松墨天牛虫害的潜在变化趋势。结果显示: 结合筛选的 12 个气象因子建立的松墨天牛平均发生率空间格局模型, 预测精度为 83.14%, 据此预测松墨天牛平均发生率在 2020s、2050s、2080s 的空间格局与 2002—2012 年相比主要呈现出四川东部、贵州中部地区中度和重度虫害发生面积明显增加; 湖南东部、江西西部和浙江西部地区虫害重度发生面积明显增加; 陕西东南部虫害重度发生面积减少; 山东东部、安徽中部虫害轻度发生面积明显缩减的趋势。

关键词: 气象因子; 松墨天牛; 发生率; 偏最小二乘回归; 空间格局

中图分类号: S763

文献标识码: A

Research on Spatial Pattern of *Monochamus alternatus*'s Occurrence Rate Based on Meteorological Factors

WANG Qing¹, BI Meng¹, MA Si-jia^{1,2}, SHI Lei¹

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: According to the data of China's *Monochamus alternatus* Hope occurrence in the period of 2002 to 2012, and taking the average occurrence rate of prefectures affected by the insect pest as a predictor, the meteorological data in those prefectures were calculated using a climate simulation software called ClimateChina v 4.40. By means of partial least squares regression, the regression equation about the average occurrence rate and meteorological factor, i. e. the spatial pattern model of average occurrence rate, was obtained to predict the future trend of potential changes on *M. alternatus* in China combined with the geospatial data and attribute data. The results showed that the spatial pattern model of *M. alternatus*' average occurrence rate built by 12 selected meteorological factors had high reliability. The prediction accuracy of the spatial pattern model was 83.14%. Based on the model, the spatial pattern of *M. alternatus*' average occurrence rate was predicted. The prediction results of the occurrence rate in 2020s, 2050s, and 2080s, showed that compared with the data of 2002 - 2012, the area with moderate or severe insect pest would be larger in eastern Sichuan, central Guizhou, eastern Hunan, western Jiangxi and western Zhejiang. The severe occurrence area in southeast Shaanxi would be less, while the mild occurrence area would de-

收稿日期: 2014-08-21

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(201204501;201004062)

作者简介: 王庆(1989—),男,硕士研究生,主要从事森林病虫害预测预警研究。

* 感谢国家林业局森林病虫害防治总站的于军处长、张旭东工程师、谭宏利处长提供本试验的病虫害数据。

** 通讯作者。

crease obviously in eastern Shandong and central Anhui.

Key words: meteorological factor; *Monochamus alternatus*; insect occurrence; partial least squares; spatial pattern

松墨天牛 (*Monochamus alternatus* Hope) 属鞘翅目 (Coleoptera) 叶甲总科 (Chrysomeloidea) 天牛科 (Cerambycidae) 沟胫天牛亚科 (Lamiinae) 墨天牛属 (*Monochamus*)^[1], 在我国多分布于陕西、山东、河北、河南、江苏、浙江、福建、安徽、江西、湖北、湖南、四川、贵州、云南、广西、广东等地, 主要寄主是针叶树种, 是松材线虫病的主要媒介昆虫^[2], 危害马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.)、落叶松 (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、云杉 (*Picea asperata* Mast.)、冷杉 (*Abies fabric* (Mast.) Craib) 等 40 多个松属 (*Pinus*) 树种^[3]。松墨天牛通常 4 月中旬开始化蛹, 5 月上旬羽化, 6 月中下旬成虫出孔高峰期。蛹发育的起始温度为 11℃ 左右, 有效积温为 167 日度左右, 幼虫发育起始温度为 12.5℃ 左右, 有效积温 625 日度左右, 羽化出孔则需要温度达到 20℃ 左右, 气温偏高出孔数量越多, 降雨量大出孔则少^[4-5]。气象因子对松墨天牛的发生与分布有显著的影响, 温度和降水 2 个气候因素对于大尺度景观, 是决定病虫害空间格局的主要因素, 它们的变化范围和病虫害潜在的空间格局有十分密切的关系^[6]。湿度影响松墨天牛的羽化率, 湿度越高, 羽化率越大^[7-8]。目前, 对松墨天牛的研究多集中在生物学特性、防治技术以及小尺度的空间格局分析^[9-14], 对于全国范围的预测预警少有研究。

本文通过分析松墨天牛平均发生率与气候因子的相关性, 建立松墨天牛平均发生率的预估模型, 并在 ClimateChina 软件的支持下, 预测未来我国松墨天牛的变化趋势。在全球气候变化的背景下, 开展气候变化对森林病虫害影响的研究可为我国应对气候变化, 有效防控森林病虫害提供重要依据, 为重大病虫害成灾机制与防控基础的研究提供决策和支持。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

1.1.1 松墨天牛发生数据的收集和提取 2002—2012 年全国范围内松墨天牛逐年发生数据, 涵盖松墨天牛发生的 16 个省级行政区的共 148 条记录、166 个地级行政区共 947 条记录、1 161 个县级行政区

共 5 424 条记录, 经数字化处理后转存到 Excel 数据表。剔除监测信息缺失的统计数据后, 本研究利用监测信息完整的 83 个地级行政区的松墨天牛逐年发生数据用作模型分析, 计算出 83 个地级行政区的平均发生率 (表 1), 并作为松墨天牛的预测指标, 其计算公式为:

$$AIR = \frac{\sum_{i=1}^n OA_i}{\sum_{i=1}^n MA_i} \times 100\% \quad (1 \leq n \leq 11 \text{ 且 } n \in N)$$

式中: AIR 为松墨天牛平均发生率, OA_i 为第 i 年松墨天牛发生面积, MA_i 为第 i 年松墨天牛监测面积, n 为松墨天牛发生总年数, N 为整数集^[15]。

表 1 发生松墨天牛的地级行政区统计数据

地区名称	总发生面积/ 万 hm^2	总监测面积/ 万 hm^2	平均发生率 /%
安庆市	1.102 9	131.741 3	0.837 2
毕节市	17.085 9	147.663 3	11.570 9
潮州市	0.006 7	7.783 3	0.086 1
郴州市	0.659 9	279.094 1	0.236 4
福州市	0.909 7	141.707 4	0.641 9
抚州市	0.691 8	536.228 9	0.129 0
广安市	1.676 8	21.215 1	7.903 8
广州市	0.009 3	7.376 7	0.126 1
贵港市	0.014 2	71.750 9	0.019 8
贵阳市	5.705 3	177.257 6	3.218 6
……	……	……	……
遵义市	6.185 9	442.911 0	1.396 6

1.1.2 气象数据的计算 用于模型分析的地级行政区 2002—2012 年的平均气象数据以及 2020s、2050s 和 2080s 的平均气象数据均由气象数据模拟软件 ClimateChina v4.40 计算得出。

ClimateChina 基于 PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 插值模型开发, 并采用双线性插值和高程校准对 PRISM 模型加以改进, 使 ClimateChina 的精度得以提升^[16-19]。提供我国任一地区的经度、纬度、高程, ClimateChina 即可导出该地区历史逐年和未来 2020s (2010—2039)、2050s (2040—2069)、2080s (2070—2099) 的年平均气温、年平均降水量、月平均气温、月平均降水量、年温湿系数、无霜期等 83 个气象因子的数据^[20], 输出的气象台站历史数据已通过中国气象科

学数据共享服务网《中国地面国际交换站气候资料年值数据集》和《中国地面国际交换站气候资料月值数据集》验证。

1.2 研究方法

1.2.1 偏最小二乘(PLS)回归 本文利用偏最小二乘(Partial Least Squares, PLS)回归建模。PLS可以在多自变量严重相关的条件下进行回归建模,可解决一些传统多元线性回归无法解决的问题。利用偏最小二乘回归建模的关键就是确定所选取的主成分个数,舍一交叉验证法(Leave One Out Cross Validation, LOOCV)可通过预测残差平方和(Predictive Residual Error Sum of Square, PRESS)来确定主成分数, PRESS 的值越小,表明模型的稳定性越强^[21]。由此,可依据 PRESS 的最小值确定用建模的主成分数。

1.2.2 变量投影重要性(VIP) 计算变量投影重要性(Variable Importance in Projection, VIP)指标可以有效地判断自变量在解释因变量 Y 时的重要性。VIP 值大于 1 时,说明自变量在解释因变量时有重要作用;VIP 值在 0.5~1.0 时,说明自变量的解释作用还不明确,需要增加样本或根据其它条件进行判断;VIP 值小于 0.5 时,说明自变量对因变量的解释基本没有意义^[22-23],通常选取 VIP 值大于 1 的自变量参与建模。

1.2.3 模型精度评价 用松墨天牛 AIR 预测值的决定系数(R^2)、平均误差(AE)、均方根误差(RMSE)、总预测相对误差(PRE)作为模型精度的评价指标,其计算公式分别如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i) \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)} \right]^2$$

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

$$PRE = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \right|}{\sum_{i=1}^n y_i} \times 100\%$$

式中: y_i 为松墨天牛 AIR 实测值; \hat{y}_i 为松墨天牛 AIR 预测值; \bar{y}_i 为实测值的平均值; $\bar{\hat{y}}_i$ 为预测值的平均值; n 为样本个数。

2 结果与分析

2.1 空间格局模型

2.1.1 气象因子的筛选 作为因变量的 2002—2012 年松墨天牛 AIR 数据为非正态分布,需经对数变换后生成符合正态分布的松墨天牛平均发生率对数变换($\ln AIR$)数据。利用 SAS9.2 对 $\ln AIR$ 数据和选取由 ClimateChina 输出的相应地区 68 个气象因子的历史数据进行 Pearson 积矩相关性分析,计算 $\ln AIR$ 数据与每个气象因子的相关关系,对分析结果做双侧显著性检验。提取与 $\ln AIR$ 数据呈显著相关的气象因子,得到 9 月平均气温(TAV09)、4 月平均最高气温(TMXX04)、5 月平均最高气温(TMXX05)、10 月平均最高气温(TMXX10)、12 月平均最高气温(TMXX12)、7 月平均最低气温(TMNN07)、夏季平均最高气温(TMAX_sm)、夏季平均最低气温(TMIN_sm)、秋季平均气温(TAV_at)、大于 5℃ 的有效积温度日(DD>5)、去年 8 月份至当年 7 月份的降雪量(PAS)、大于 5℃ 的有效积温度日达到 100 的儒略日(DD5₁₀₀) 12 个气象因子作为建立回归模型的入选因子(表 2)。

表 2 $\ln AIR$ 数据与气象因子的相关性系数

气象因子	平均发生率 对数变换数据	P 值
9 月平均气温(TAV09)	-0.465 2	<0.000 1
4 月平均最高气温(TMXX04)	-0.433 7	<0.000 1
5 月平均最高气温(TMXX05)	-0.554 0	<0.000 1
10 月平均最高气温(TMXX10)	-0.568 8	<0.000 1
12 月平均最高气温(TMXX12)	-0.474 0	<0.000 1
7 月平均最低气温(TMNN07)	-0.282 7	0.009 6
夏季平均最高气温(TMAX_sm)	-0.344 1	0.001 4
夏季平均最低气温(TMIN_sm)	-0.336 1	0.001 9
秋季平均气温(TAV_at)	-0.492 9	<0.000 1
大于 5℃ 的有效积温度日(DD>5)	-0.506 1	<0.000 1
去年 8 月份至当年 7 月份的降雪量(PAS)	0.256 6	0.019 2
大于 5℃ 的有效积温度日达到 100 的儒略日(DD5 ₁₀₀)	0.332 3	0.002 1

2.1.2 气象因子的 VIP 值 在进行 PLS 回归时,计算出参与建立模型的 12 个气象因子的 VIP 值(图 1),其中, VIP 值大于 1 的气象因子排序依次为:5 月平均最高气温 > 10 月平均最高气温 > 秋季平均气温 > 12 月平均最高气温 > 4 月平均最高气温 > 大于 5℃ 的有效积温度日达到 100 的儒略日 > 去年 8 月份至当年 7 月份的降雪量 > 夏季平均最高气温 > 9 月平均气温,说明其对于 $\ln AIR$ 具有很强的解释作用。大于 5℃ 的有效积温度日、夏季平均最低气温、

7月平均最低气温的VIP值虽然在0.5~1.0之间,但由于有效积温对松墨天牛卵、幼虫的发育都有影响,且夏季(尤其是6—7月)又为松墨天牛普遍的盛发期,所以将这3个气象因子和之前9个气象因子,共12个气象因子全部作为建立空间格局模型的入选变量。

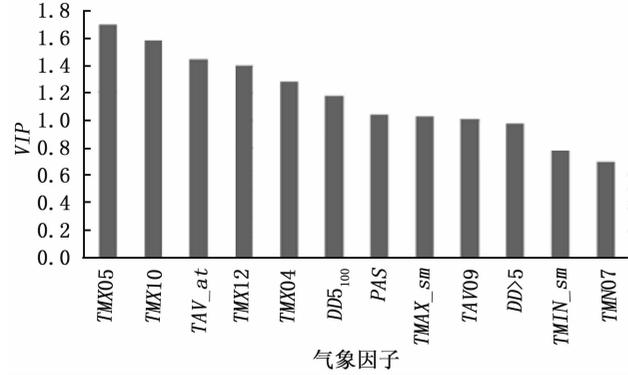


图1 筛选后的气象因子VIP值

2.1.3 空间格局模型的建立 用松墨天牛 lnAIR 作为因变量,筛选出的12个气象因子作为自变量,利用83个地级行政区的数据进行PLS回归运算,随主成分数的增加,PRESS值不断减小,当主成分数为9时,PRESS达到最小值为0.6781,因此,选取9个主成分参与建模,并得到松墨天牛AIR空间格局模型,计算公式如下:

$$AIR = \exp(35.9769 + 2.6413 \times TAV09 + 0.4245 \times TMX04 - 2.3927 \times TMX05 - 2.5165 \times TMX10 + 2.2242 \times TMX12 - 1.7666 \times TMN07 + 1.0586 \times TMAX_sm + 2.3512 \times TMIN_sm - 5.0073 \times TAV_at + 0.0072 \times DD > 5 + 0.6861 \times PAS - 0.0328 \times DD5_{100})$$

利用2011—2012年松墨天牛平均发生率数据对模型进行精度检验,结果显示:2011—2012年松墨天牛平均发生率实测值和预测值具有线性关系(图2):决定系数(R^2)为0.8579,平均误差(AE)为0.2319,均方根误差(RMSE)为1.1183,总预测相对误差(PRE)为16.86%,整体预测精度达到83.14%,说明模型能够用于松墨天牛AIR的空间格局分析,具有实际预测意义。

2.2 空间格局分析

将我国全境DEM数据中提取的地理坐标点数据导入ClimateChina,分别得出在2002—2012年、2020s、2050s和2080s4个时期参与空间格局模型建立的12个气象因子的数据。在ArcGIS10中,依据

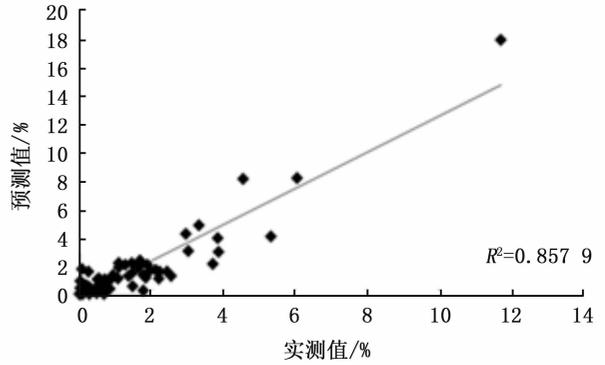


图2 松墨天牛均发生率精度检验

空间格局模型,计算出地理坐标点的松墨天牛AIR值,结合2002—2012年我国松墨天牛的空间分布,分别得到我国松墨天牛AIR从2002—2012年到2080s的变化趋势,并生成我国松墨天牛AIR空间格局专题图(图3~6)。



图3 松墨天牛平均发生率2002—2012年空间格局示意图

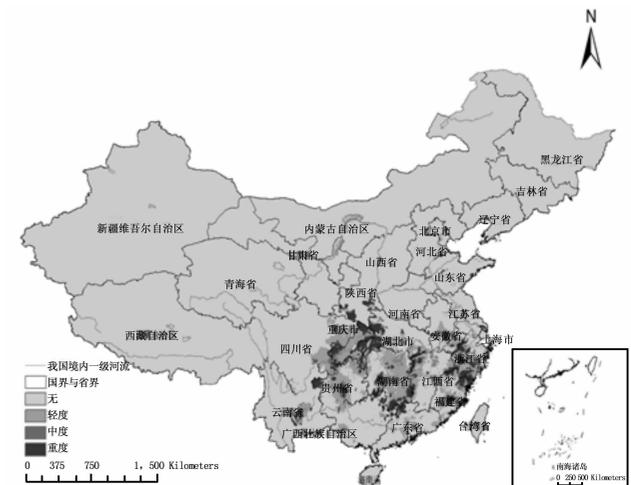


图4 松墨天牛平均发生率2020s空间格局示意图



图5 松墨天牛平均发生率2050s空间格局示意图



图6 松墨天牛平均发生率2080s空间格局示意图

将各地区的松墨天牛的发生、发展程度按照《林业有害生物发生及成灾标准》分为无、轻度($AIR < 10\%$)、中度(AIR 为 $10\% \sim 20\%$)和重度($AIR >$

20%)4个等级,并分别统计出2002—2012年、2020s、2050s和2080s我国松墨天牛各等级的发生面积(表3)。

表3 松墨天牛各等级发生面积

时间	轻度发生面积		中度发生面积		重度发生面积		总发生面积 /万 km ²
	/万 km ²	占总发生面积 比值/%	/万 km ²	占总发生面积 比值/%	/万 km ²	占总发生面积 比值/%	
2002—2012	58.372	67.88	7.116	8.28	20.503	23.84	85.991
2020s	45.904	65.73	6.263	8.97	17.666	25.30	69.833
2050s	41.785	68.10	4.629	7.54	14.944	24.36	61.358
2080s	31.077	61.86	4.821	9.60	14.341	28.54	50.239

3 结论与讨论

研究表明,2002—2012年我国松墨天牛虫害主要分布在陕西、四川、湖北、湖南、江西、福建、云南、安徽、浙江等省份。陕西南部、湖北西部、贵州北部为比较集中的重度成灾区域,湖南、浙江、福建、云南也有部分重灾地区。全国重度发生面积为20.503万 km²,占总发生面积的23.84%。中度及轻度虫害广泛分布于四川省东部及贵州、湖南、江西、浙江全境,轻度发生面积为58.372万 km²,占总发生面积的67.88%,中度发生面积7.116万 km²,占总发生面积的8.28%。

同2002—2012年相比,2020s松墨天牛轻度发生面积为45.904万 km²,占总发生面积比值降至65.73%;中度发生面积降至6.263万 km²,占总发生面积比值上升至8.97%;重度发生面积为17.666万 km²,占总发生面积比值上升至25.30%。2050s,松墨天牛轻度发生面积继续减少,为41.785万 km²,但占总发生面积比值回升至68.10%;中度发生面积减少

到4.629万 km²,但占总发生面积比值降至7.54%;重度发生面积为14.944万 km²,占总发生面积比值降至24.36%。2080s,松墨天牛轻度发生面积减少到31.077万 km²,占总发生面积比值降至61.86%;中度发生面积也减少为4.821万 km²,占总发生面积比值回升至9.60%;重度发生面积上升到14.341万 km²,占总发生面积比值升至28.54%。2002—2012年到2080s,松墨天牛轻度发生面积占总发生面积比值逐渐减少,中度发生面积占总发生面积比值略有增加,重度发生面积占总发生面积比值则呈增加趋势,总发生面积为递减状态。

预测结果显示,松墨天牛发生区总发生面积呈缩减趋势,其中,四川东部、贵州中部地区中度和重度虫害发生面积明显增加;湖南东部、江西西部和浙江西部地区虫害重度发生面积明显增加;陕西南部虫害重度发生面积减少;湖北西部、重庆东北部和浙江中部地区重度发生面积总体比较稳定;山东东部、安徽中部虫害轻度发生面积明显缩减。松墨天牛全国发生区内轻度发生面积总体亦呈缩减趋势。

根据 IPCC 对我国未来气候变化评估,21 世纪中叶,长江及其以南地区的地面年平均气温升高 $1.2 \sim 1.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 华南和江淮地区秋季的平均降雨量有所增加,冬季平均降雨量则减少,西南地区的年平均降雨量呈减少趋势;21 世纪末期,长江及其以南地区的地面年平均气温可升高 $3.0 \sim -4.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,年平均降雨量普遍增加幅度低于 5% [24-25];21 世纪中叶和末期,由于影响松墨天牛发生发展的降雨量在长江及其以南地区变化幅度的不确定性,与松墨天牛在未来 2020s、2050s 和 2080s 没有呈明显的扩散趋势有密切关系。

由于本研究是基于病虫害与气候的稳定变化趋势进行研究,而实际情况往往是病虫害的流行扩散速度滞后于气候变化的速度,所以模拟的松墨天牛发生率空间格局只是潜在分布,并非将来某一时期的实际分布,并且松褐天牛的发生发展除与气象因子关系密切之外,同时还受林木抗性、寄主、地形、土壤以及人为干扰等因素的影响,所以模型仍有待于进一步完善;但可以预测,如果未来时期实际气候变化朝着本研究预测的方向发展,则松墨天牛发生率的空间格局也会朝着相应的预测方向发展。

参考文献:

[1] 萧刚柔. 中国森林昆虫[M]. 北京:中国林业出版社,1992.

[2] 石雷. 基于 3S 技术的云南省松材线虫病风险评估[M]. 北京:中国林业出版社,2010.

[3] 张新平,焦淑萍,张静文,等. 松墨天牛入侵新疆的风险分析[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):110-113.

[4] 张星耀. 森林病理学研究的生态数学方法[M]. 北京:中国林业出版社,1999:76-98.

[5] 张星耀,骆有庆. 中国森林重大生物灾害[M]. 北京:中国林业出版社,2003.

[6] 常晓娜,高慧景,陈法君,等. 环境温湿度和降雨对昆虫的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(4):619-625.

[7] 孔维娜,王慧,李捷,等. 温湿度对松墨天牛越冬幼虫寿命的影响[J]. 山西农业大学学报,2006,26(3):294-295.

[8] 泽桑梓,闫争亮,赵涛,等. 我国松墨天牛防治及引诱技术研究的现状及前景分析[J]. 西部林业科学,2010,39(3):93-96.

[9] 杨忠武,黄吉平,杨春生,等. 桂林市松墨天牛生物学特性研究[J]. 广西林业科学,2010,39(1):5-7.

[10] 王文琦,张伟,陶热,等. 松墨天牛成虫野外空间格局[J]. 中国农学通报,2010,26(17):256-259.

[11] 王玲萍,陈顺立,武福华,等. 松墨天牛幼虫空间格局的研究[J]. 福建林学院学报,2002,22(1):1-3.

[12] 周书永,陈绘画,徐卫民. 松墨天牛成虫发生期预测[J]. 东北林业大学学报,2013,41(7):100-103.

[13] 周樟庭,徐真旺,戴黎瑶,等. 冰雪冻灾后松墨天牛成虫种群数量动态研究[J]. 中国森林病虫,2011,30(3):18-24.

[14] 徐正会,段艳,史胜利,等. 云南省松墨天牛地理分布及危害程度调查[J]. 西南林学院学报,2010,30(2):37-42.

[15] 毕猛,杜婷,石雷,等. 基于气象因子的杨树溃疡病发生率空间格局研究[J]. 林业科学研究,2014,27(1):24-30.

[16] Wang T, Hamann A, Spittlehouse D L, et al. Development of scale-free climate data for western Canada for use in resource management[J]. International Journal of Climatology, 2006,26(3):383-397.

[17] Hamann A, Wang T L. Models of climate normals for genecology and climate change studies in British Columbia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005,128(3-4):211-221.

[18] Daly C, Gibson W P, Taylor G H, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate[J]. Climate Research, 2002,22(2):99-113.

[19] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. International Journal of Climatology, 2005,25(6):693-712.

[20] 张雷,刘世荣,孙鹏森,等. 气候变化对马尾松潜在分布影响预估的多模型比较[J]. 植物生态学报,2011,35(11):1091-1105.

[21] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(3)(偏最小二乘回归与 PLS 过程)[J]. 数理统计与管理,2002,21(2):58-64.

[22] 王惠文,吴载斌,孟浩. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006.

[23] Chong I G, Jun C H. Performance of some variable selection methods when multicollinearity is present[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2005,78(1-2):103-112.

[24] 汤剑平,陈星,赵鸣,等. IPCC A2 情景下中国区域气候变化的数值模拟[J]. 气象学报,2008,66(1):13-25.

[25] 江志红,张霞,王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估[J]. 地理研究,2008,27(4):787-799.